



S hvězdným větrem v plachtách

prof. Mgr. Jiří Krtička, Ph.D.

Ústav teoretické fyziky a astrofyziky
Masarykova univerzita, Brno

Hvězda – stálice?

- neměnná jasnost
- stálé místo na obloze vzhledem k ostatním hvězdám
- neměnná hmotnost

Hvězda – stálice?

- ~~• neměnná jasnost~~
- ~~• stálé místo na obloze vzhledem k ostatním hvězdám~~
- ~~• neměnná hmotnost~~
- proměnné hvězdy: mění svoji jasnost
- hvězdy se vzájemně pohybují
- hvězdy mohou ztrácet svoji látku

Svědectví o ztrátě hmoty

- obálky v okolí hvězd



optický a rentgenový snímek SNR 0509-67.5



Svědectví o ztrátě hmoty

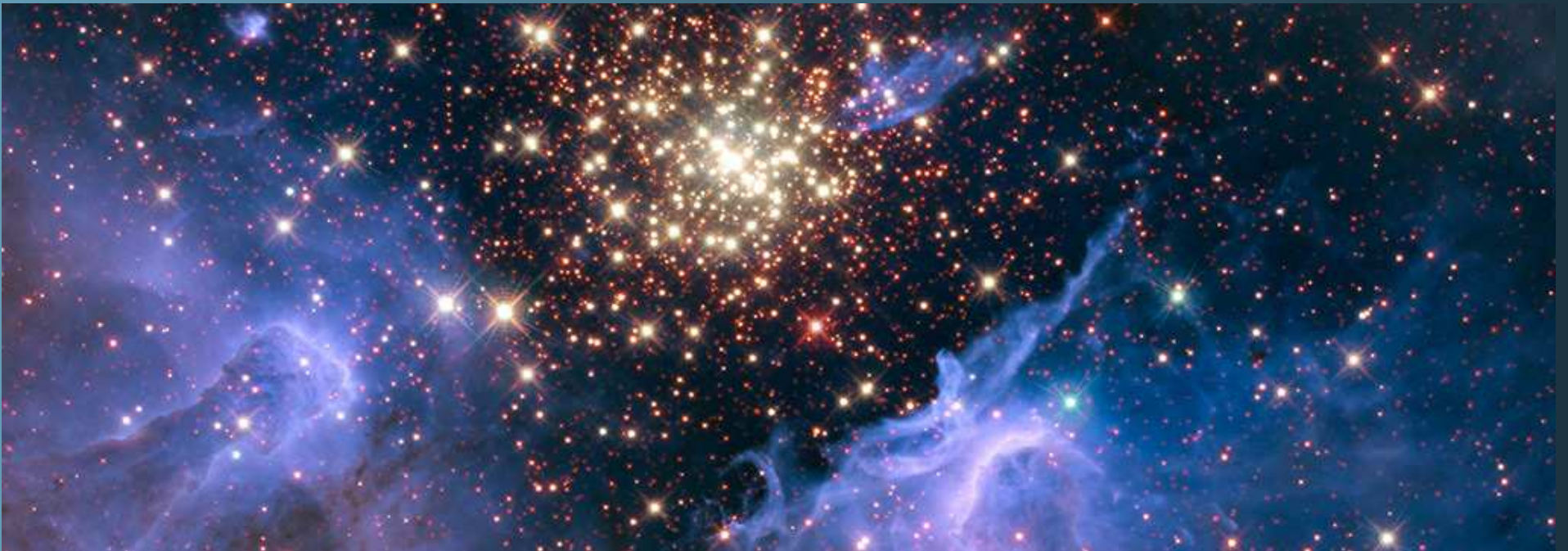
- obálky v okolí hvězd



mlhovina v okolí Miry (o Cet)

Svědectví o ztrátě hmoty

- mezihvězdné prostředí



hvězdokupa NGC 3603

Korunní svědek: těžší prvky

- chemické složení raného vesmíru:
 - vodík, helium, velmi malé množství lithia
 - zcela chybí těžší prvky (C, N, O, Fe, ...)

Korunní svědek: těžší prvky



Korunní svědek: těžší prvky

- chemické složení raného vesmíru:
 - vodík, helium, velmi malé množství lithia
 - zcela chybí těžší prvky (C, N, O, Fe, ...)
- odkud se vzaly těžší prvky?

Korunní svědek: těžší prvky

- chemické složení raného vesmíru:
 - vodík, helium, velmi malé množství lithia
 - zcela chybí těžší prvky (C, N, O, Fe, ...)
- odkud se vzaly těžší prvky?
 - těžší prvky vznikají při termonukleárních reakcích v nitru hvězd

Korunní svědek: těžší prvky

- chemické složení raného vesmíru:
 - vodík, helium, velmi malé množství lithia
 - zcela chybí těžší prvky (C, N, O, Fe, ...)
- odkud se vzaly těžší prvky?
 - těžší prvky vznikají při termonukleárních reakcích v nitru hvězd
- jak se těžší prvky dostaly do mezihvězdného prostředí?

Korunní svědek: těžší prvky

- chemické složení raného vesmíru:
 - vodík, helium, velmi malé množství lithia
 - zcela chybí těžší prvky (C, N, O, Fe, ...)
 - odkud se vzaly těžší prvky?
 - těžší prvky vznikají při termonukleárních reakcích v nitru hvězd
 - jak se těžší prvky dostaly do mezihvězdného prostředí?
- ⇒ musí existovat způsob, kterým hvězdy přicházejí o určitou část své hmoty

Jak uvolnit látku z povrchu hvězdy?

- rychlost látky musí být vyšší než úniková rychlost
- pro Slunce je úniková rychlost

$$v_{\text{únik}} = 620 \text{ km s}^{-1}$$

Jak uvolnit látku z povrchu hvězdy?

- srovnání:

$$v_{\max} = 200 \text{ km hod}^{-1} \approx 9 \times 10^{-5} v_{\text{únik}}(\odot)$$



lokomotiva E109 (Škoda Plzeň)

Jak uvolnit látku z povrchu hvězdy?

- srovnání:

$$v_{\max} = 935 \text{ km hod}^{-1} \approx 4 \times 10^{-4} v_{\text{únik}}(\odot)$$



letoun L159 Alca (Aero Vodochody)

Jak uvolnit látku z povrchu hvězdy?

- srovnání: $v_{\max} \approx 10 \text{ km s}^{-1} \approx 10^{-2} v_{\text{únik}}(\odot)$



raketa Ariane 5 (ESA)

Jak uvolnit látku z povrchu hvězdy?

ztráta hmoty *samostatných* hvězd

- ustálené proudění: *hvězdný vítr*
 - koronální hvězdný vítr
 - hvězdný vítr urychlovaný absorpcí záření na prachových částicích
 - hvězdný vítr urychlovaný absorpcí záření v čarách

Jak uvolnit látku z povrchu hvězdy?

ztráta hmoty *samostatných* hvězd

- ustálené proudění: *hvězdný vítr*
 - koronální hvězdný vítr
 - hvězdný vítr urychlovaný absorpcí záření na prachových částicích
 - hvězdný vítr urychlovaný absorpcí záření v čarách
- explozivní procesy
 - výbuch supernovy
 - vzplanutí „nepravé“ supernovy

Porovnání s pozemským větrem

Země

hvězdy

Porovnání s pozemským větrem

	Země	hvězdy
směr proudění	po povrchu	od povrchu

Porovnání s pozemským větrem

	Země	hvězdy
směr proudění	po povrchu	od povrchu
rychlost	$\approx 1 \text{ m s}^{-1}$	$\approx 1000\,000 \text{ m s}^{-1}$

Porovnání s pozemským větrem

	Země	hvězdy
směr proudění	po povrchu	od povrchu
rychlost	$\approx 1 \text{ m s}^{-1}$	$\approx 1000\,000 \text{ m s}^{-1}$
hustota	$10^{-3} \text{ g cm}^{-3}$	$\lesssim 10^{-10} \text{ g cm}^{-3}$

Porovnání s pozemským větrem

	Země	hvězdy
směr proudění	po povrchu	od povrchu
rychlost	$\approx 1 \text{ m s}^{-1}$	$\approx 1000\,000 \text{ m s}^{-1}$
hustota	$10^{-3} \text{ g cm}^{-3}$	$\lesssim 10^{-10} \text{ g cm}^{-3}$
teplota	$\approx 10 \text{ }^\circ\text{C}$	$\approx 1000 \text{ }^\circ\text{C}$

Porovnání s pozemským větrem

	Země	hvězdy
směr proudění	po povrchu	od povrchu
rychlost	$\approx 1 \text{ m s}^{-1}$	$\approx 1000\,000 \text{ m s}^{-1}$
hustota	$10^{-3} \text{ g cm}^{-3}$	$\lesssim 10^{-10} \text{ g cm}^{-3}$
teplota	$\approx 10 \text{ }^\circ\text{C}$	$\approx 1000 \text{ }^\circ\text{C}$
složení	N_2, O_2	H, He, těžší prvky

Má Slunce sluneční vítr?

- dva druhy ohonů komet (Biermann 1951)



Má Slunce sluneční vítr?

- polární záře



Co urychluje sluneční vítr?

- typická rychlost částic plynu

$$v_{\text{sk}} = \sqrt{\frac{3kT}{m_{\text{H}}}}$$

- T je teplota
- m_{H} je hmotnost částic (vodíku)

Co urychluje sluneční vítr?

- typická rychlost částic plynu

$$v_{\text{sk}} = \sqrt{\frac{3kT}{m_{\text{H}}}}$$

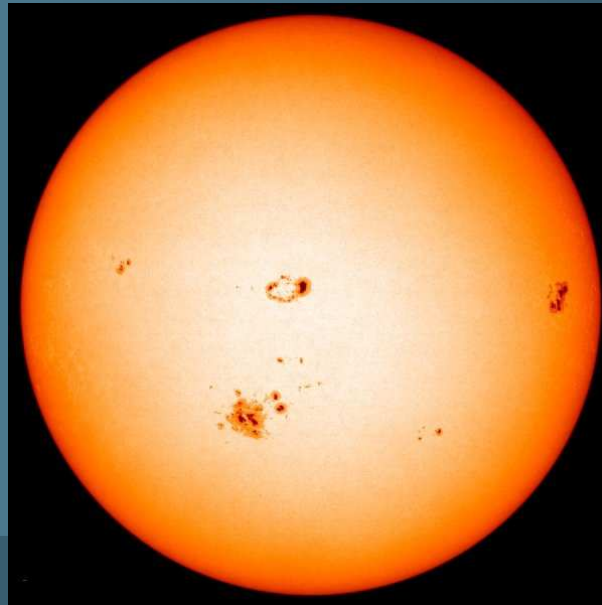
- pro $v_{\text{sk}} \approx v_{\text{únik}}$ by částice mohly unikat z povrchu Slunce pouze v důsledku svého tepelného pohybu

Co urychluje sluneční vítr?

- typická rychlost částic plynu

$$v_{\text{sk}} = \sqrt{\frac{3kT}{m_{\text{H}}}}$$

- teplota povrchových vrstev Slunce je 6000 °C



Co urychluje sluneční vítr?

- typická rychlost částic plynu

$$v_{\text{sk}} = \sqrt{\frac{3kT}{m_{\text{H}}}}$$

- teplota povrchových vrstev Slunce je $6000\text{ }^{\circ}\text{C}$
- tomu odpovídá $v_{\text{sk}} = 12\text{ km s}^{-1} \ll v_{\text{únik}}$

Úplné zatmění Slunce



Total Solar Eclipse 2008

© 2008 Miloslav Druckmüller, Peter Aniol, Martin Dietzel, Vojtech Rušin

Úplné zatmění Slunce

- Slunce má rozsáhlou a řídkou obálku:
koróna
- koróna pozorovatelná při úplném zatmění

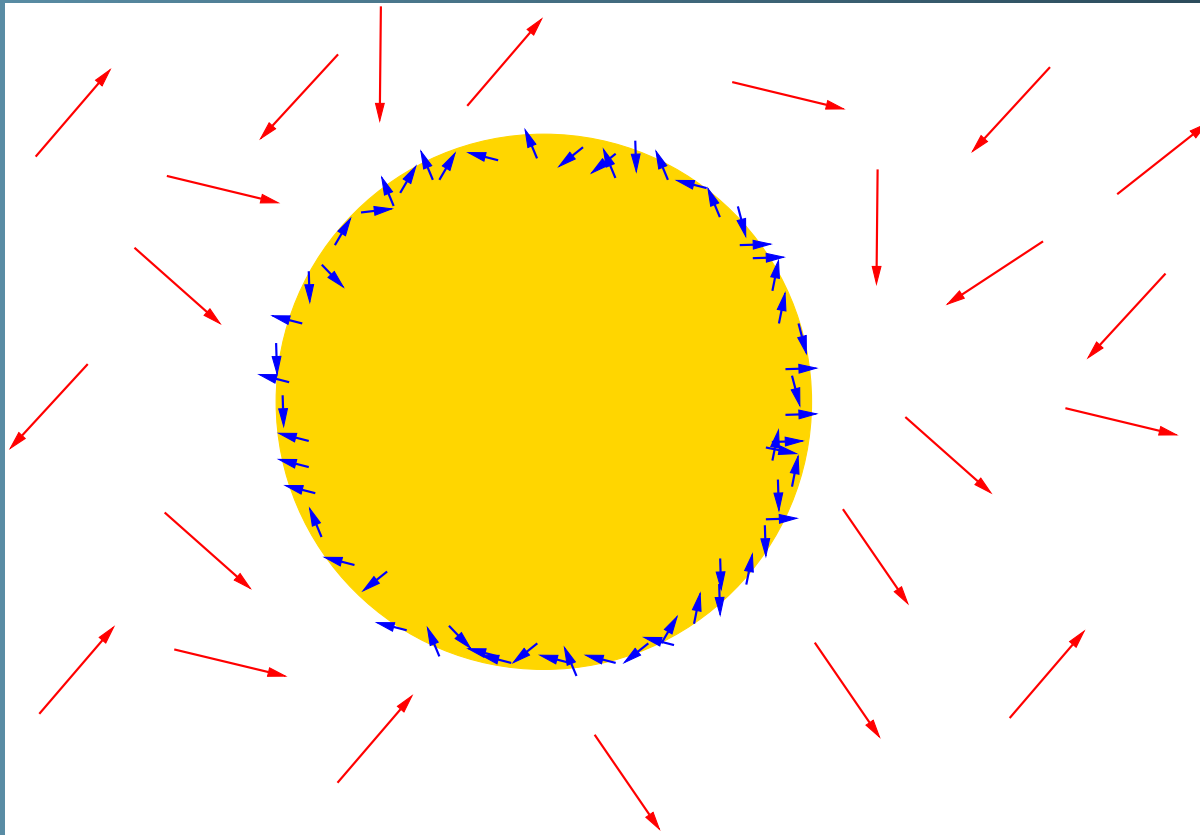
Úplné zatmění Slunce

- Slunce má rozsáhlou a řídkou obálku: *koróna*
- koróna pozorovatelná při úplném zatmění
- teplota koróny je řádově $10^5 - 10^6$ K

Úplné zatmění Slunce

- Slunce má rozsáhlou a řídkou obálku: *koróna*
- koróna pozorovatelná při úplném zatmění
- teplota koróny je řádově $10^5 - 10^6$ K
- odpovídající střední kvadratická rychlost je řádově 100 km s^{-1}
- částice s touto rychlostí mohou opouštět Slunce

Sluneční vítr: tepelné rozpínání koróny



- tepelné rozpínání koróny příčinou slunečního větru (Parker 1958)

Sluneční vítr: tepelné rozpínání koróny



- tepelné rozpínání koróny příčinou slunečního větru (Parker 1958)

Sluneční vítr: tepelné rozpínání koróny



- tepelné rozpínání koróny příčinou slunečního větru (Parker 1958)

Družicová pozorování

- 60. léta 20. století: proud částic od Slunce (protony, elektrony, jádra He, ...)

Družicová pozorování

- 60. léta 20. století: proud částic od Slunce (protony, elektrony, jádra He, ...)
- rychlost $\sim 500 \text{ km s}^{-1}$
- koncentrace ($r = 1 \text{ au}$) $\sim 10^7 \text{ částic m}^{-3}$

Družicová pozorování

- 60. léta 20. století: proud částic od Slunce (protony, elektrony, jádra He, ...)
- rychlost $\sim 500 \text{ km s}^{-1}$
- koncentrace ($r = 1 \text{ au}$) $\sim 10^7 \text{ částic m}^{-3}$
- míra ztráty hmoty

$$\dot{M} = 4\pi r^2 \rho v \approx 2 \times 10^{-14} M_{\odot} \text{ rok}^{-1}$$

Je sluneční vítr důležitý?

- nemůže se Slunce vypařit?



Je sluneční vítr důležitý?

- nemůže se Slunce vypařit?
- Slunce bude hvězdou hlavní posloupnosti
~ 10×10^9 let

Je sluneční vítr důležitý?

- nemůže se Slunce vypařit?
- Slunce bude hvězdou hlavní posloupnosti
 $\sim 10 \times 10^9$ let
- Slunce ztrácí hvězdným větrem
 $2 \times 10^{-14} M_{\odot} \text{ rok}^{-1}$

Je sluneční vítr důležitý?

- nemůže se Slunce vypařit?
 - Slunce bude hvězdou hlavní posloupnosti
 $\sim 10 \times 10^9$ let
 - Slunce ztrácí hvězdným větrem
 $2 \times 10^{-14} M_{\odot} \text{ rok}^{-1}$
 - za celou dobu pobytu na hlavní posloupnosti
ztratí $\sim 10^{-4} M_{\odot}$
- ⇒ příliš malé množství na ovlivnění slunečního vývoje

Vítr svítivých chladných hvězd

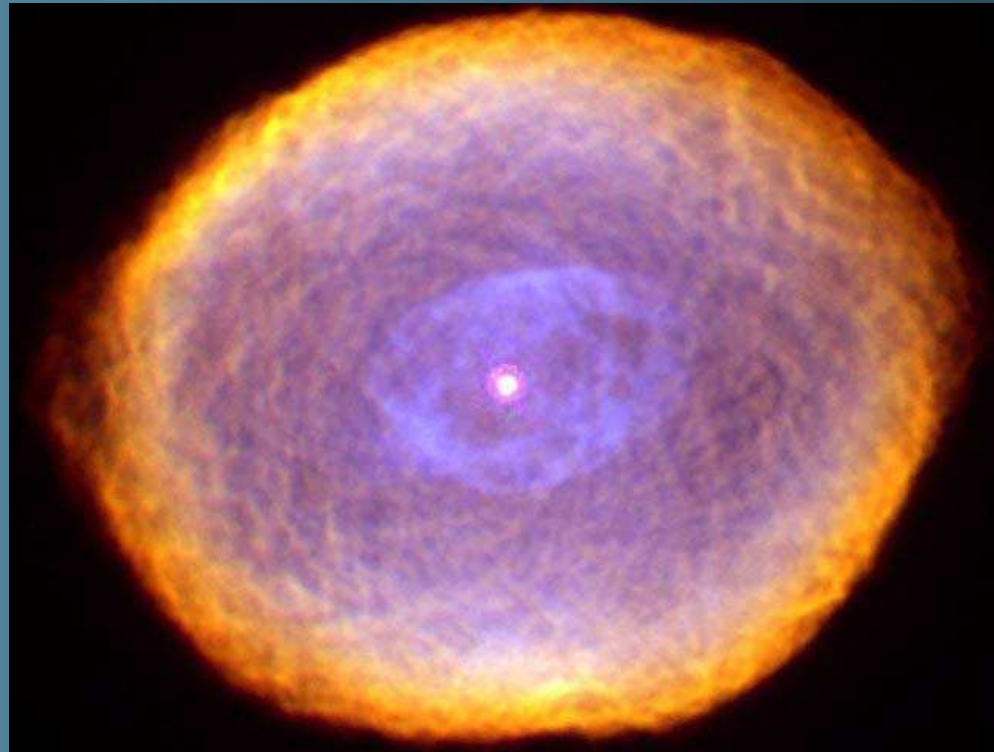
- chladné svítivé hvězdy ($L = 10^4 - 10^6 L_{\odot}$) mají také hvězdné větry



mlhovina v okolí Miry (o Cet)

Vítr svítivých chladných hvězd

- chladné svítivé hvězdy ($L = 10^4 - 10^6 L_{\odot}$) mají také hvězdné větry



planetární mlhovina IC 418

Vítr svítivých chladných hvězd

- chladné svítivé hvězdy mají také hvězdné větry



planetární mlhovina IC 418

Vítr svítivých chladných hvězd

- chladné svítivé hvězdy ($L = 10^4 - 10^6 L_{\odot}$) mají také hvězdné větry
- koronální hvězdný vítr?

Vítr svítivých chladných hvězd

- chladné svítivé hvězdy ($L = 10^4 - 10^6 L_{\odot}$) mají také hvězdné větry
- koronální hvězdný vítr?
- pozorování tomu nenasvědčují

Zářivá síla?

- hvězdy mají vysoký zářivý výkon

Zářivá síla?

- hvězdy mají vysoký zářivý výkon
- fotony mají energii $E_\nu = h\nu$, ale také hybnost

$$p_\nu = \frac{E_\nu}{c}$$

Zářivá síla?

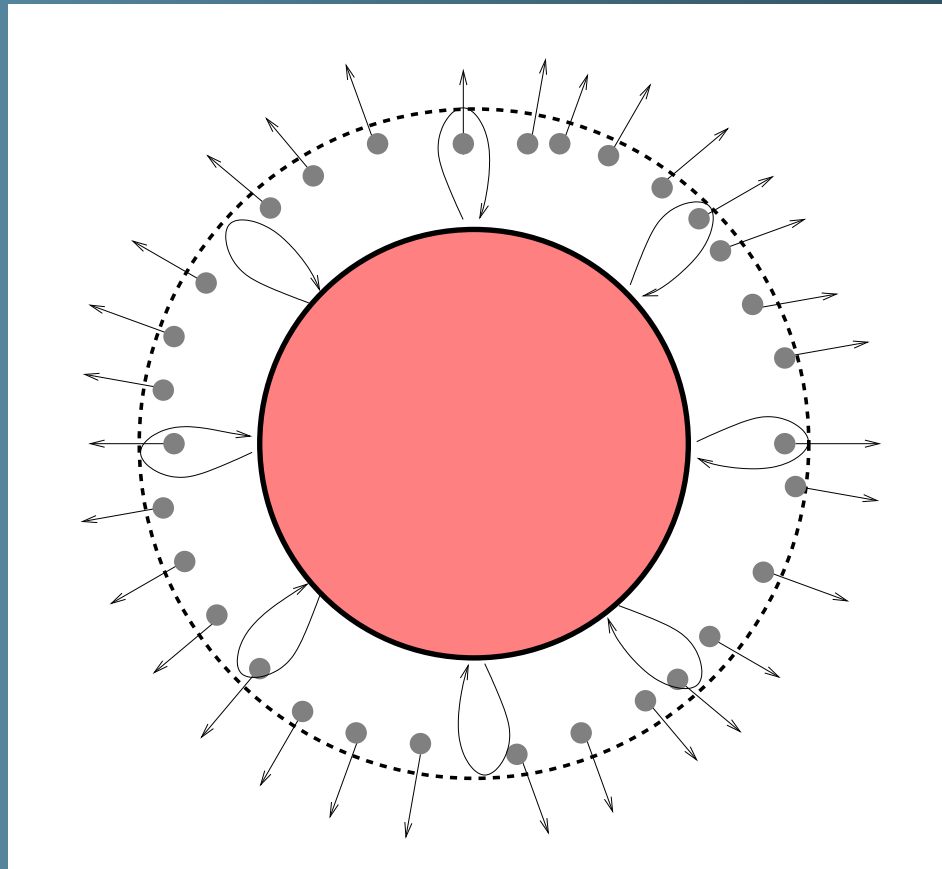
- hvězdy mají vysoký zářivý výkon
- fotony mají energii $E_\nu = h\nu$, ale také hybnost
- urychlování látky v důsledku absorpce záření?

Zářivá síla?

- hvězdy mají vysoký zářivý výkon
- fotony mají energii $E_\nu = h\nu$, ale také hybnost
- urychlování látky v důsledku absorpce záření?
- zářivá síla v důsledku absorpce záření na prachových částicích schopna urychlit vítr
- hvězdné pulzace uvolní látku z povrchu hvězdy a vytvářejí obálku
- v chladné plynové obálce kondenzují prachové částice, které urychlují vítr

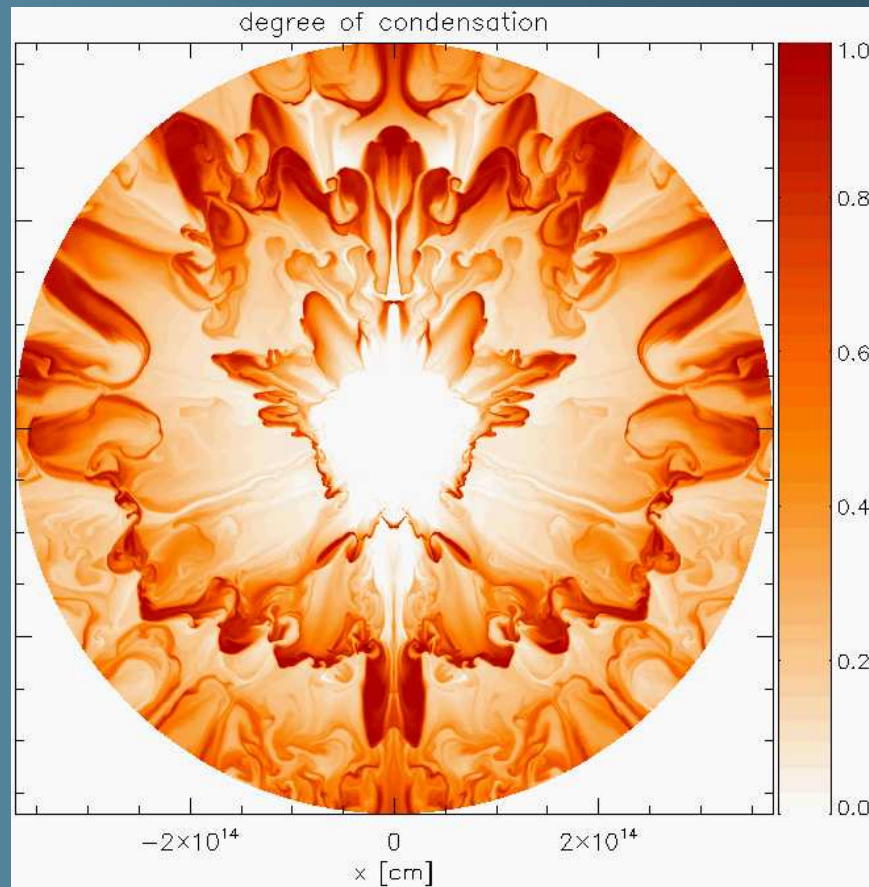
Vítr svítivých chladných hvězd

⇒ *prachem urychlovaný hvězdný vítr*



Vítr svítivých chladných hvězd

⇒ *prachem urychlovaný hvězdný vítr*



(Woitke 2005)

Vítr svítivých chladných hvězd

⇒ *prachem urychlovaný hvězdný vítr*

- typická míra ztráty hmoty $10^{-5} M_{\odot} \text{ rok}^{-1}$

Vítr svítivých chladných hvězd

⇒ *prachem urychlovaný hvězdný vítr*

- typická míra ztráty hmoty $10^{-5} M_{\odot} \text{ rok}^{-1}$
- doba trvání odpovídající fáze hvězdného vývoje $\sim 10^5$ let

Vítr svítivých chladných hvězd

⇒ *prachem urychlovaný hvězdný vítr*

- typická míra ztráty hmoty $10^{-5} M_{\odot} \text{ rok}^{-1}$
- doba trvání odpovídající fáze hvězdného vývoje $\sim 10^5$ let

⇒ hvězdy mohou ztratit podstatnou část své hmotnosti prachem urychlovaným větrem

Vítr svítivých chladných hvězd

⇒ *prachem urychlovaný hvězdný vítr*

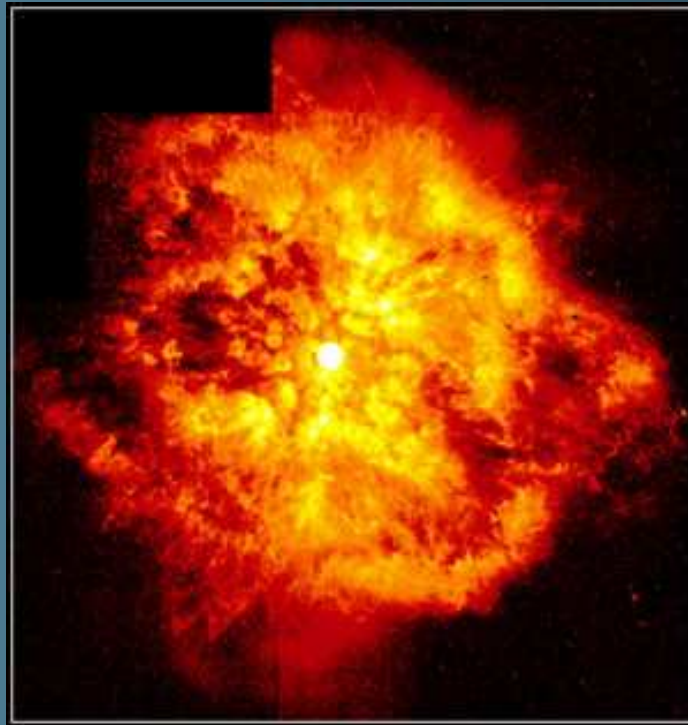
- typická míra ztráty hmoty $10^{-5} M_{\odot} \text{ rok}^{-1}$
- doba trvání odpovídající fáze hvězdného vývoje $\sim 10^5$ let

⇒ hvězdy mohou ztratit podstatnou část své hmotnosti prachem urychlovaným větrem

- Slunce v budoucnu ztratí tímto způsobem zhruba polovinu své hmoty

Hvězdný vítr horkých hvězd

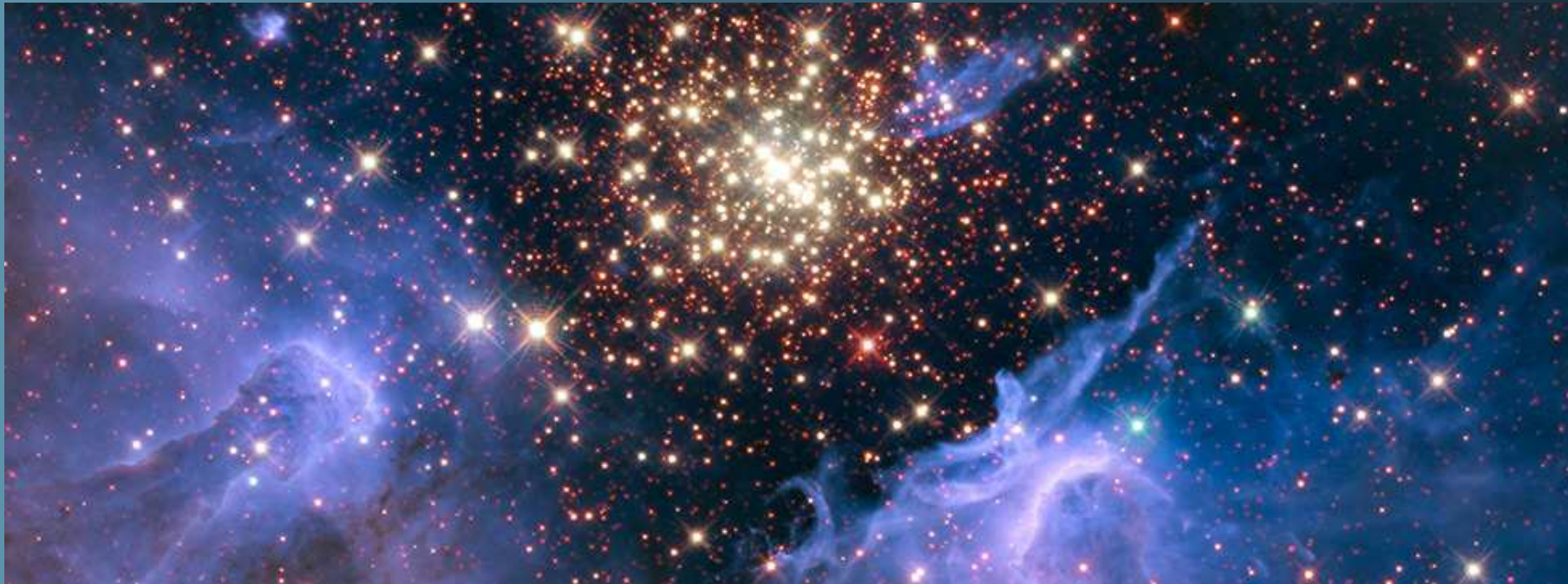
- horké hvězdy mají hvězdné větry



mlhovina v blízkosti hvězdy WR 124

Hvězdný vítr horkých hvězd

- horké hvězdy mají hvězdné větry



hvězdokupa NGC 3603

Hvězdný vítr horkých hvězd

- horké hvězdy mají hvězdné větry
- horké hvězdy nemají koróny \Rightarrow nemají koronální vítr

Hvězdný vítr horkých hvězd

- horké hvězdy mají hvězdné větry
- horké hvězdy nemají koróny \Rightarrow nemají koronální vítr
- horké hvězdy jsou zářivé: zářivá síla urychluje vítr?

Hvězdný vítr horkých hvězd

- horké hvězdy mají hvězdné větry
- horké hvězdy nemají koróny \Rightarrow nemají koronální vítr
- horké hvězdy jsou zářivé: zářivá síla urychluje vítr?
 - zářivá síla v důsledku absorpce záření na prachových částicích – prachové částice by se vypařily

Hvězdný vítr horkých hvězd

- horké hvězdy mají hvězdné větry
- horké hvězdy nemají koróny \Rightarrow nemají koronální vítr
- horké hvězdy jsou zářivé: zářivá síla urychluje vítr?
 - zářivá síla v důsledku absorpce záření na prachových částicích – prachové částice by se vypařily
 - zářivá síla v důsledku absorpce v čarách těžších prvků?

Spektrální čáry

- atomy a ionty ve vázaných stavech mohou mít pouze určité hodnoty energie

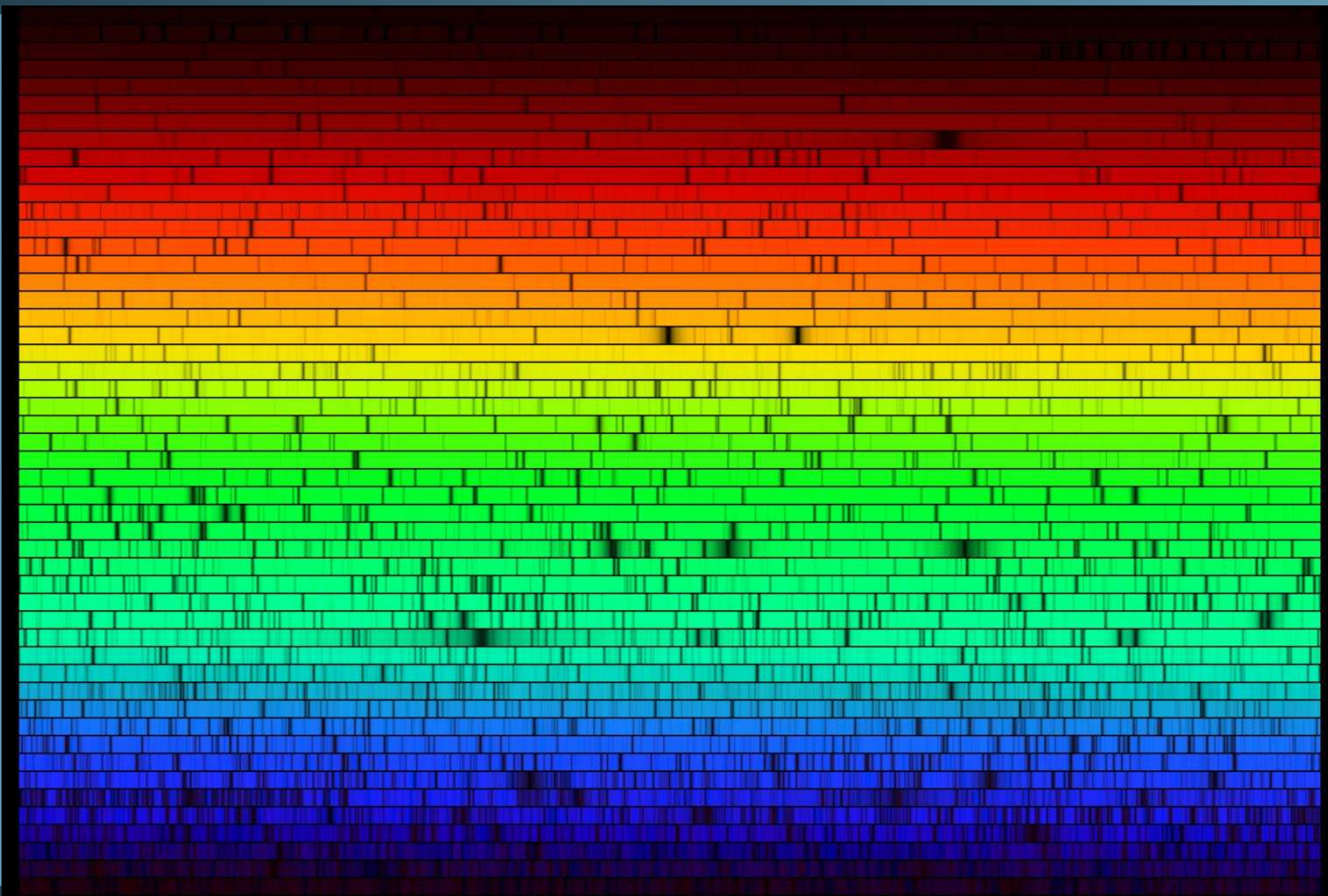
Spektrální čáry

- atomy a ionty ve vázaných stavech mohou mít pouze určité hodnoty energie
- při přechodu mezi jednotlivými vázanými stavy jsou absorbovány nebo emitovány pouze fotony s určitou vlnovou délkou

Spektrální čáry

- atomy a ionty ve vázaných stavech mohou mít pouze určité hodnoty energie
- při přechodu mezi jednotlivými vázanými stavy jsou absorbovány nebo emitovány pouze fotony s určitou vlnovou délkou
- ve spektru pozorujeme *spektrální čáry*

Spektrální čáry



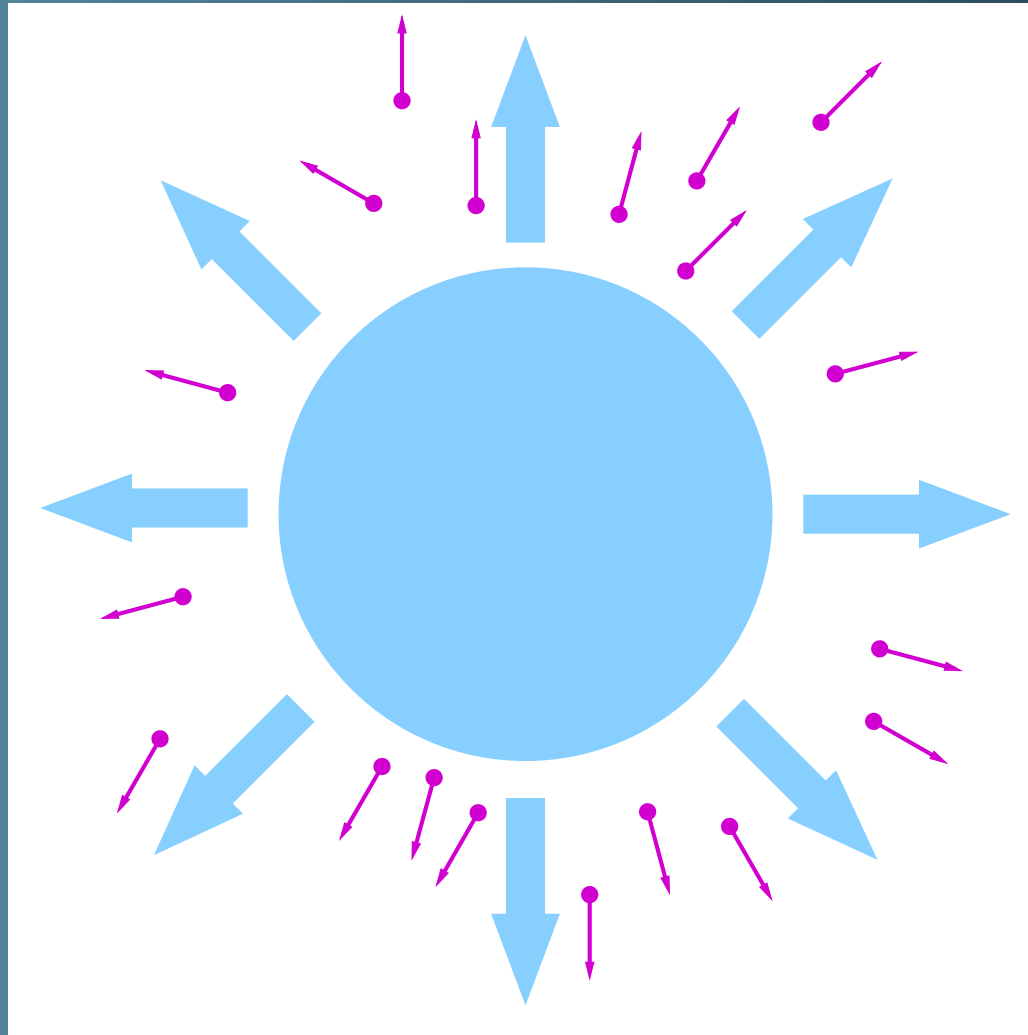
Spektrální čáry

- atomy a ionty ve vázaných stavech mohou mít pouze určité hodnoty energie
- při přechodu mezi jednotlivými vázanými stavy jsou absorbovány nebo emitovány pouze fotony s určitou vlnovou délkou
- ve spektru pozorujeme *spektrální čáry*
- při absorpci foton předává svoji hybnost atomu (iontu)

Zářením hnaný vítr horkých hvězd

- zářivá síla v důsledku absorpce záření v čarách těžších prvků (Fe, C, N, O, ...) schopna urychlit hvězdný vítr horkých hvězd (Lucy a Solomon 1970, Castor, Abbott a Klein 1975)

Zářením hnaný vítr horkých hvězd



Zářením hnaný vítr horkých hvězd

- míra ztráty hmoty v důsledku absorpce záření v jedné výrazné čáře (L je zářivý výkon hvězdy)

$$\dot{M} \approx \frac{L}{c^2}$$

Zářením hnaný vítr horkých hvězd

- míra ztráty hmoty v důsledku absorpce záření v jedné výrazné čáře (L je zářivý výkon hvězdy)

$$\dot{M} \approx \frac{L}{c^2}$$

- míra ztráty hmoty až $10^{-6} - 10^{-5} M_{\odot} \text{ rok}^{-1}$

Zářením hnaný vítr horkých hvězd

- míra ztráty hmoty v důsledku absorpce záření v jedné výrazné čáře (L je zářivý výkon hvězdy)

$$\dot{M} \approx \frac{L}{c^2}$$

- míra ztráty hmoty až $10^{-6} - 10^{-5} M_{\odot} \text{ rok}^{-1}$
- rychlost větru až řádově 10^3 km s^{-1}

Je vítr horkých hvězd důležitý?

- horké hvězdy mají hmotnost $\sim 10 M_{\odot}$
 - doba života horkých hvězd $\sim 10^6$ let
 - ztrácí hvězdným větrem $\sim 10^{-6} M_{\odot} \text{ rok}^{-1}$
 - horké hvězdy ztrácí hvězdným větrem podstatnou část své hmoty
- ⇒ hvězdný vítr zásadně ovlivňuje vývoj horkých hvězd

S hvězdným větrem v plachtách?



S hvězdny

ntách?



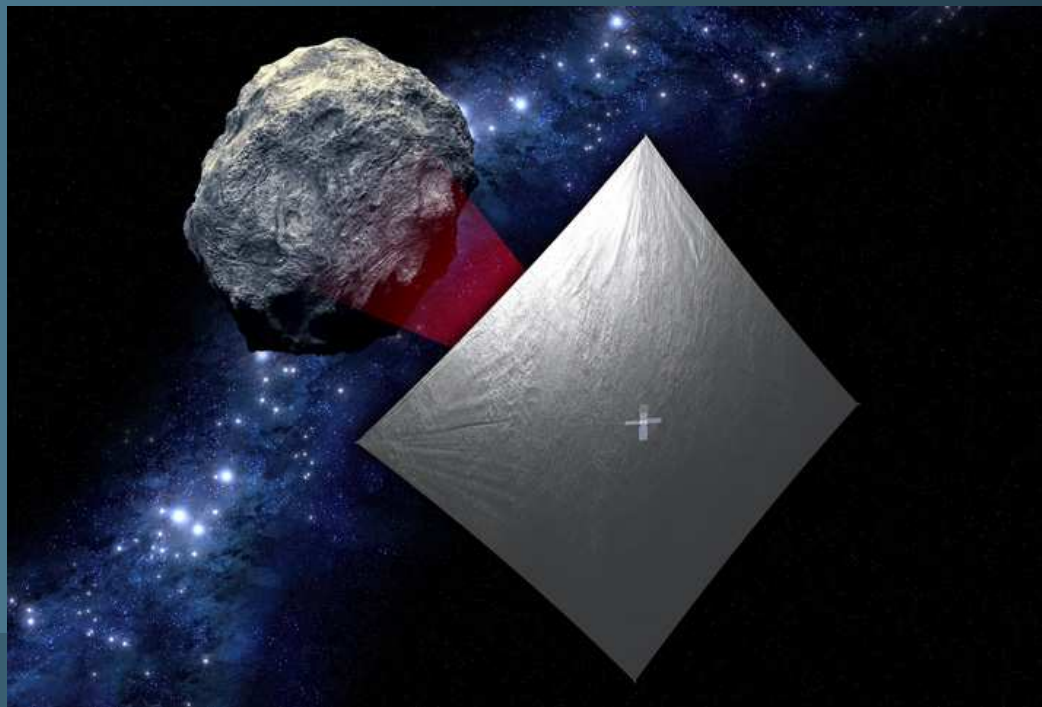
H. P. Lovecraft

S hvězdným větrem v plachtách?



S hvězdným větrem v plachtách!

- družice NASA Near-Earth Asteroid Scout bude využívat plachtu
- cílem je prozkoumat planetku 1991 VG
- družice přípravou pro pozdější lidské výpravy



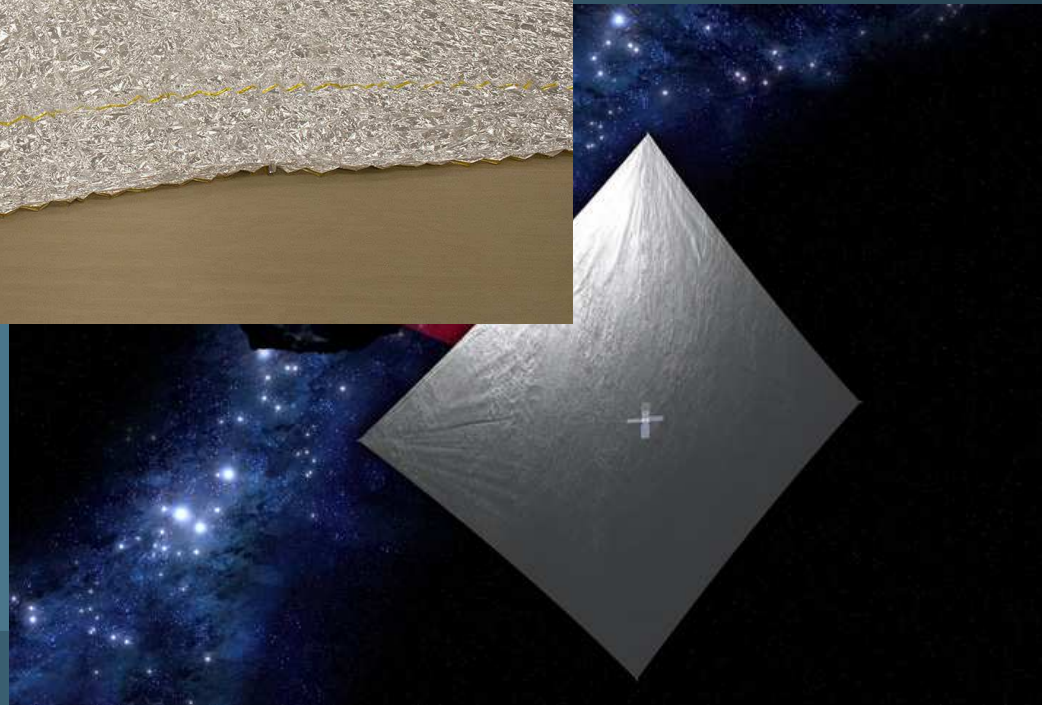
S hvězdným větrem v plachtách!



eroid Scout

991 VG

lidské výpravy



S hvězdným větrem v plachtách!

- družice NASA Near-Earth Asteroid Scout bude využívat plachtu
- cílem je prozkoumat planetku 1991 VG
- družice přípravou pro pozdější lidské výpravy
- urychlování vlivem působení zářivé síly, vliv slunečního větru zanedbatelný

Do plachet nám vítr vál...

- hvězdy mohou hvězdným větrem ztratit podstatnou část své látky
- ve hvězdném větru je možné i plachtit

